

ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК

О. К. Сильченко

*Государственный астрономический институт Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова*

В лекции будет рассказано об эволюции галактик, как мы ее сейчас себе представляем. Эволюция галактик может изучаться с помощью двух основных подходов — либо подробное исследование близких галактик разных типов и построение моделей, которые дают похожие на наблюдаемые конечные результаты эволюции; либо прямое наблюдение галактик на разных красных смещениях, что из-за конечной скорости света позволяет увидеть последовательные стадии эволюции, начиная с самых ранних. В жизни галактики важны следующие процессы, составляющие разные стороны ее эволюции: динамическая эволюция, определяющая также и структуру галактики; эволюция звездного населения, определяющая интегральное излучение галактики; наконец, химическая эволюция, отражающая изменение химического состава газа и звезд в галактике. Одним из самых главных вкладчиков в эти различные стороны эволюции галактики является ее история звездообразования.

EVOLUTION OF GALAXIES

O. K. Silchenko

*Sternberg Astronomical Institute of the Lomonosov Moscow State
University*

I would talk about evolution of galaxies as we can only imagine it currently. The evolution of galaxies can be studied through two different approach: we can study in detail some nearby galaxies of various morphological types and try to construct models with the similar final properties; or we can observe distant galaxies at various redshifts which, due to the finite light speed, represent different evolutionary stages, starting from the earliest ones. The most important processes in the life of a galaxy are: dynamical evolution which shapes also its structure; evolution of the stellar population which is simultaneously spectrophotometric evolution; and the chemical evolution which drives the metallicity growth in the gas and stars of the galaxy. The main contributor into many of these evolutionary processes is star formation history of a galaxy.

Введение

Эра внегалактической астрономии началась менее ста лет назад. В 1926 г. Эдвин Хаббл [1] впервые предложил свою морфологическую классификацию галактик: расположил в строчку (он назвал это «последовательности») эллиптические и спиральные галактики. Окончательный вид схема типов галактик приняла десятью годами позже в его эпохальной книге [2]; ее адаптация с современными фотографиями галактик представлена на рис. 1. Западные коллеги называют эту схему немного грубо — «вилка Хаббла», в русскоязычной астрономии бытует куда более возвышенное описание — «камертон Хаббла».

Проанализируем морфологическую схему типов галактик сперва чисто визуально. Слева располагаются эллиптические галактики. Это однородные на вид сфероидальные системы, состоящие из красных звезд, которые не разрешаются и сливаются в одно туманное облако. Деталей в них не видно, поэтому всю классификацию эллиптических галактик, последовательно заполняющих «ручку» камертона Хаббла, он основал на видимом отношении осей эллипсоида — от абсолютно круглых изображений до вытянутых с отношением осей тройка. Справа располагаются спиральные галактики: вдоль одного из зубцов — диски с барами, вдоль другого — диски без баров. Спиральные галактики, в отличие от простых однокомпонентных эллиптических галактик, куда более сложны на вид. У них, как правило, присутствует как минимум два крупномасштабных структурных компонента: сфероидальные балджи в центре — такая мини-эллиптическая галактика — внутри большого звездного диска. В свою очередь, диски демонстрируют внутри себя кучу более мелких деталей: спиральные ветви, отдельные области звездообразования, перемиčky в центре... Вдоль каждого зубца, слева направо, увеличивается раскрытость спиральных ветвей, их неоднородность (клочковатость), а также уменьшается вклад балджа в общую светимость. Хаббл назвал «левые» типы галактик ранними, а «правые» — поздними, и эти названия используются до сих пор. Конечно, практически сразу Хаббла стали спрашивать: название «ранние» означает, что эти галактики появились раньше? И он объяснил, что его схема — чисто морфологическая, создана для работы со статистикой форм многих сотен наблюдавшихся уже тогда галактик, и он совершенно не претендует на «теорию эволюции» галактик. Однако тогда у исследователей галактик все же осталось некое подозрение: ранние

типы куда менее богаты деталями, так, может, эти детали развились в процессе эволюции? И только с набором статистики, когда стало ясно, что галактики поздних типов менее массивны, чем галактики ранних типов, эти подозрения исчезли. А в конце XX в., когда космологи рассчитали эволюцию всей Вселенной сразу в рамках своей космологической модели, они вернули схеме Хаббла эволюционный смысл, только перевернули его: согласно космологическим представлениям первыми во Вселенной появились дисковые галактики самых поздних типов, а уже позже они, сливаясь, породили морфологический тип эллиптических галактик.

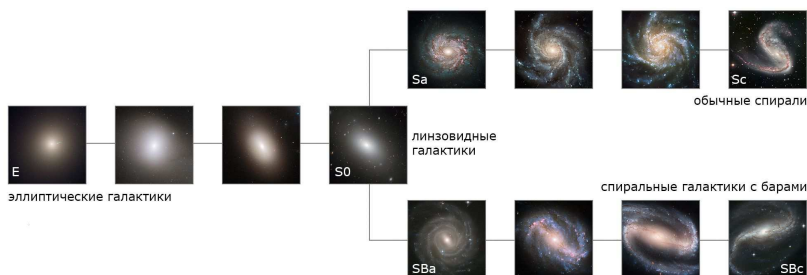


Рис. 1. Морфологическая классификация галактик Хаббла (дизайн картинки А. В. Каспаровой)

Каково же процентное соотношение морфологических типов галактик в нашей локальной Вселенной? Больше всего вокруг нас спиральных галактик: более 70 % галактик ближней Вселенной — спиральные. На втором месте располагаются линзовидные галактики (S0), их 15 %. Линзовидные галактики — это тоже дисковые галактики, как и спиральные. Но Хаббл считал их переходным типом между левой и правой частями схемы: у линзовидных галактик двухкомпонентная структура, состоящая из балджа и диска, как и у спиральных, но однородный красноватый вид, без деталей, который роднит их с эллиптическими галактиками. Из-за этого их часто объединяют в «галактики ранних типов», хотя и структурно, и динамически линзовидные галактики куда более близкие родственники спиральных, чем эллиптических. Эллиптических галактик в ближней Вселенной всего 3—5 %, даже меньше, чем неправильных. Правда, тут нужно оговориться, что пропорция морфологических типов сильно зависит от плотности расположения галактик в данном конкретном месте: в

скоплениях галактик преобладают ранние типы, в самых больших из них до 60 % всех галактик могут быть линзовидными и до 30 % — эллиптическими. Но скоплений мало, в ближней Вселенной только 7 % всех галактик входят в скопления.

Каковы основные механизмы эволюции, проявления которых мы наблюдаем в близких галактиках?

Динамическая и структурная эволюция. Механизмы динамической эволюции галактик весьма многообразны. В свое время Корменди и Кенникат в своем знаменитом обзоре [3] привели структурированную схему всех возможных механизмов динамической эволюции. Они разделили все механизмы на быстрые (динамические времена порядка сотен миллионов лет) и медленные (динамические времена порядка нескольких миллиардов лет), а также на внутренние и внешние, требующие воздействия окружающей среды и/или соседних галактик. Получился квадрат. В углу «быстрых внутренних» царит «монолитный коллапс» — формирование звездного тела галактики из протогалактического газового облака в результате сжатия этого облака под действием собственной гравитации. В углу «быстрых внешних» расположились слияния галактик сравнимых масс (так называемый «большой мержинг») и удаление газа из спиральных галактик, влетающих в скопления галактик, лобовым давлением горячей межгалактической среды.

Медленные механизмы называют еще «секулярной» (вековой) эволюцией. В эту категорию входят очень много конкретных воздействий — как внутренние неустойчивости холодных галактических дисков, так и множественное поглощение спутников, и приливные эффекты, связанные с взаимодействием галактик, и плавная аккреция внешнего холодного газа на диск, питающая звездообразование во всех дисковых галактиках.

От того, какие динамические механизмы действуют в галактике (на галактику), зависит и ее структура. Например, известно, что большой мержинг — слияние двух спиральных галактик сравнимых масс — породит в итоге одну большую эллиптическую галактику со вспышкой звездообразования в центре. Или если в холодном звездно-газовом диске развивается внутренняя неустойчивость, то в его центре образуется бар (перемычка), который, в свою очередь, возмуща-



Рис. 2. Классификация механизмов динамической эволюции согласно [3]

ет газ и заставляет его стекать в центр галактики. Здесь, в центре галактики, скопившийся газ может либо превратиться в звезды и нарастить балдж, либо запитать центральную сверхмассивную черную дыру и таким образом зажечь активное ядро в галактике. Звездообразование в спиральных галактиках, как правило, происходит довольно равномерно, падая по экспоненте в течение миллиардов лет. Если на тех же характерных временах происходит радиальное перераспределение газа — из внешних областей во внутренние, — то формируются экспоненциальные профили поверхностной яркости звездных дисков галактик, которые реально и наблюдаются в спиральных и линзовидных галактиках практически в универсальном режиме [4].

Спектрофотометрическая эволюция галактик — это изменение со временем распределения энергии в интегральном спектре галактики. Наиболее наглядно она проявляется в изменении *цвета* галактики или каких-то частей галактик. Особо выделяют «пассивную эволюцию» спектра галактики: это если одновременно образовалось какое-то поколение звезд и далее все эти звезды мирно эволюционировали сами по себе. В процессе пассивной эволюции первыми, через какие-то 10—30 млн лет, вымирают самые массивные звезды спектрального класса О, и интегральный цвет галактики перестает быть голубым. Через миллиард лет приходит черед умирать для звезд массой $2 M_{\odot}$, и галактика становится желтой. Старые звездные системы — а к ним относят шаровые скопления и эллиптические галактики — имеют в своем звездном составе только звезды с массой $1 M_{\odot}$ и меньше, т. е. в основном карлики и гиганты спектрального класса G и позже. Из-за этого эллиптические галактики красные. А вот шаровые скопления все равно голубые, хоть и старые. Это оттого, что химический состав звезд шаровых скоплений очень беден металлами — на порядок и даже на два беднее, чем Солнце. Понижение металличности звезд повышает прозрачность их атмосфер и приводит к поглубению. Шаровые скопления — звездные системы, пассивно эволюционировавшие в течение последних 11—13 млрд лет, — выглядят такими же голубыми, как массивные Sc-галактики, у которых солнечный химический состав и довольно интенсивное звездообразование все последние 5—8 млрд лет. Это называется «эффект выжидания возраста и металличности».

Химическая эволюция галактик и Вселенной в целом — это изменение химического состава газа и звезд в галактиках, которое последние 13.5 млрд лет происходит из-за того, что газ превращается в звезды, проходит через цикл термоядерных реакций в звездах и после смерти звезды выбрасывается в межзвездную среду уже обогащенным вновь синтезированными химическими элементами. То есть химическая эволюция галактик тесно связана с их историей звездообразования (как, впрочем, и спектрофотометрическая эволюция). Надо сказать, что основа химического состава Вселенной — 70 % по массе водорода и 25 % гелия — нам досталась в наследство от Большого взрыва. Именно в первые 20 мин жизни Вселенной, еще в супе из свободно летящих фотонов, а вовсе не в звездах, были синтезированы водород с изотопами дейтерий и тритий, гелий (оба изотопа), литий (оба изотопа) и немного бериллия, который, впрочем, был нестабилен и весь распался в литий. Все эле-

менты тяжелее бора, — это продукты термоядерных реакций в звездах. Много лет спектроскописты охотятся за звездой «нулевой металличности» — той, которая унаследовала бы первичный химический состав от Большого взрыва, звездой из самого первого поколения звезд. Однако эта охота до сих пор безуспешна: удалось найти в гало нашей Галактики лишь несколько звезд с металличностью одна десятитысячная — одна сотысячная от солнечной. Отсюда родилась гипотеза, почти миф, о звездах «населения III», которые насинтезировали начальный уровень металлов и все умерли, потому что все были очень массивными. Теперь в спектрах очень далеких галактических дисков пытаются найти характерный рисунок (соотношение обилия различных элементов таблицы Менделеева), который не похож на все, что мы видим вблизи нас, который можно было бы приписать сверхмассивным звездам «населения III».

Наблюдения далеких галактик — прямая эволюция?

Скорость света конечна. Это означает, что от далеких объектов свет до нас идет вполне заметное время. От ближайшей звезды свет идет до нас 4 года. От далеких галактик свет идет до нас миллиарды лет. Это означает, что, наблюдая галактику сегодня, мы на самом деле видим ее такой, какой она была миллиарды лет назад. И чем дальше от нас галактика, которую мы сегодня наблюдаем, тем дальше в ее прошлое мы проникаем. На рис. 3 показано, как связаны красное смещение наблюдаемой галактики и то, насколько давно она была такой, какой мы ее сегодня видим. Поскольку время, потраченное светом на то, чтобы дойти до нас, зависит от геометрии пространства, в соотношение рис. 3 входят космологические параметры. Согласно современным представлениям о космологических параметрах, характеризующих всю Вселенную целиком (а они известны космологам очень точно), галактики на красном смещении 0.5 мы наблюдаем 5 млрд лет назад, галактики на красном смещении единица — 8 млрд лет назад. Сейчас на больших телескопах уже успешно наблюдаются большие выборки галактик на красном смещении 5, а это всего 1 млрд лет после Большого взрыва. Можно сказать, что всю эволюцию галактик мы реально наблюдаем «на просвет», прощупывая одну эпоху за другой. Что это, прямое наблюдение эволюции галактик? На самом деле не все так просто. В разные эпохи мы сейчас наблюдаем *разные* галактики, а не одну и ту же. На-

селения галактик на разных красных смещениях могут быть весьма непохожи друг на друга. Чтобы построить эволюционную последовательность, связать разные галактики на разных красных смещениях в единую цепочку эволюционных стадий, все равно нужна модель. Этот подход к эволюции галактик тоже модельно зависим.

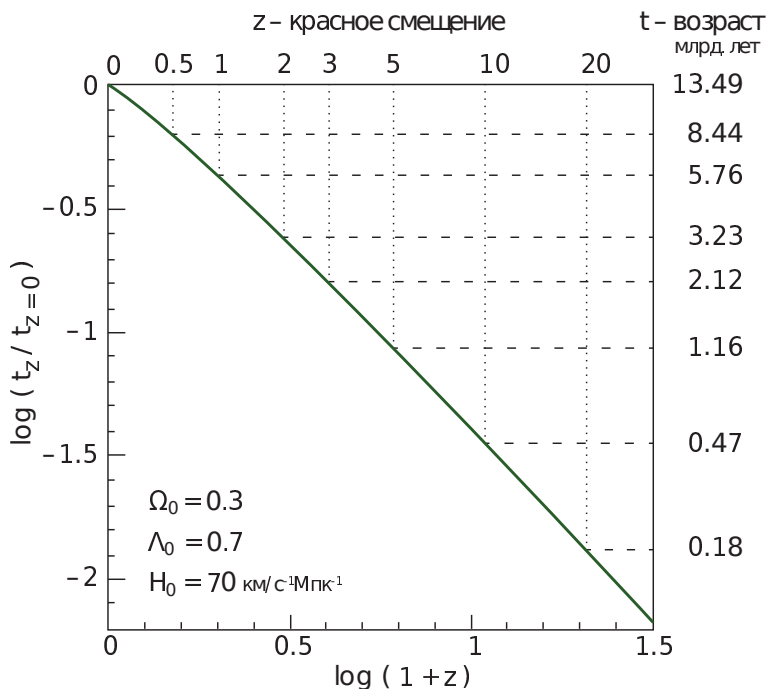


Рис. 3. Связь между красным смещением объекта и моментом в жизни Вселенной, в который мы его наблюдаем — из-за конечной скорости света

Насколько реально велики трудности прямого наблюдательного подхода к исследованию эволюции галактик на больших красных смещениях, показала история с глубокими хаббловскими полями. Тут имя собственное относится не к Эдвину Хабблу, а к космическому телескопу имени Хаббла. Когда в 1994 г. удалось исправить пространственное разрешение изображений, получаемых Хаббловским космическим телескопом, до одной десятой секунды дуги, пришло время замахнуться на далекие слабые объекты. Была выбрана площадка, на взгляд совершенно пустая, в созвездии Большой Мед-

ведицы, и далее Хаббловский космический телескоп, летая по своей орбите, наводясь на эту площадку время от времени, в конце концов накопил чистые две недели экспозиции. Удалось достичь фотометрического предела около 29-й звездной величины. На полученном в нескольких фильтрах изображении площадки со стороны 2 минуты дуги в результате исследователи разглядели 9 слабых звезд нашей Галактики, около 40 белых карликов и более 2 000 галактик. Самая близкая из них — эллиптическая галактика на $z = 0.09$. Несколько десятков галактик глубокого Хаббловского поля (северного) находятся на красных смещениях больше 2. Какая галактика самая далекая, оценить трудно: по цвету одна из галактик может быть на красном смещении 12, но она так слаба, что спектра получить не удалось и бесспорного доказательства этого красного смещения не последовало.

Открытие, которое немедленно в 1997 г. огласили исследователи глубокого Хаббловского поля (северного), состояло в том, что до красного смещения 1 удалось классифицировать наблюдаемые галактики в рамках схемы Хаббла. То есть последние 8 млрд лет Вселенная была наполнена в основном спиральными галактиками, а также галактиками линзовидными и эллиптическими. А вот на $z > 1.5$ привычные Хаббловские морфологические типы исчезают, и галактики становятся странными на вид: это цепочки или кучки небольших сгустков размером каждый до 1 кпк. Космологи торжествовали: они же предсказывали, что сначала образуются карликовые диски, которые потом сливаются в более крупные галактики. Ну вот же, в глубоком Хаббловском поле они сливаются на глазах! Астрономы-наблюдатели были более осторожны: а может быть, мы просто видим самые яркие области звездообразования на фоне больших дисков, области, которые затмевают собой слабый окружающий диск без звездообразования? Разрешить этот спор могла только динамика: лучевые скорости сливающихся сгустков должны различаться куда сильнее, чем скорости областей звездообразования одного и того же диска. Через десять лет подросли панорамные спектрографы на 8-метровом телескопе VLT, построили карты лучевых скоростей комковатых галактик, и да — это оказались единые большие диски с регулярным круговым вращением, только звездообразование в них происходит в гигантских сгустках, которых в настоящую эпоху уже почти не осталось. Спиралей в таких дисках быть не может, как и баров: они слишком толстые, динамически горячие, устойчивые против внутренних неосесимметричных возмущений. А вот гравитационная

неустойчивость газового компонента дисков, который в этих далеких галактиках 10 млрд лет назад почти равнялся по массе звездному компоненту, работает и приводит к фрагментации газового диска на гигантские плотные сгустки, в которых звездообразование идет на порядок более эффективно, чем в современную эпоху в спиральных ветвях.

Наблюдения далеких галактик — критический тест для сценариев эволюции

Очень показательной в качестве иллюстрации важности и взаимодополняемости двух подходов к исследованию эволюции галактик является история со сценарием эволюции гигантских эллиптических галактик.

Начиная со второй половины 70-х гг. прошлого столетия, когда начались точные спектральные наблюдения галактик, все думали, что эллиптические галактики образуются большим мержингом — слиянием примерно равных по массе спиральных галактик. Дело в том, что гигантские эллиптические галактики почти не вращаются, а любое протогалактическое облако, будь оно газовое или из темной материи, обязано иметь момент вращения, потому что мимо летают соседи и приливным гравитационным воздействием его обязательно раскручивают. Момент вращения отнять довольно трудно, — это не энергия, которую газ может просто высветить. И в конце концов придумали чуть ли не единственно возможный динамический механизм, благодаря которому звездная система теряет момент: слияние галактик сходных масс. При таком слиянии («большом мержинге») происходит бурная релаксация, и, как показывают расчеты, конечный «продукт» будет сфероидальным и не будет вращаться. Как раз в точности как эллиптические галактики. Однако в 2000-х гг. с этим сценарием возникли проблемы.

Численное моделирование больших мержингов с высоким пространственным разрешением показало, что все хорошо, но... исчезают радиальные градиенты металличности, даже если до этого они и были в сливающихся дисках [5]. Потому что релаксация при слияниях такая бурная, что все перемешивается, в том числе и по радиусу, и галактика приобретает абсолютно однородный химический состав звезд во всех своих частях. Между тем в эллиптических галактиках радиальные градиенты металличности есть. Мы в 2007 г. опубликовали результаты глубокой спектроскопии пяти близких гигантских

эллиптических галактик, наблюдавшихся на 6-метровом телескопе САО РАН [6]. Поскольку наша спектроскопия была глубже, чем обычно получали до нас, мы впервые зафиксировали изломы градиентов металличности примерно на половине эффективных радиусов. То есть во внутренних частях эллиптических галактик получались очень крутые градиенты металличности, несовместимые с событием большого мерджинга в жизни галактики, по крайней мере в последние 10 млрд лет. А во внешних частях градиенты металличности получились плоские, т. е. для внешних частей допускалось бурное радиальное перемешивание звездного населения. И тогда в 2007 г. мы предложили сценарий образования и эволюции гигантских эллиптических галактик, в котором было два главных этапа. Сейчас этот сценарий называют «двухфазным».

Первый этап, который должен был состояться раньше, чем $z = 3$, подразумевал монолитный коллапс большого газового облака с последующим звездообразованием, — в таком сценарии ожидается компактный размер получившейся звездной системы из-за диссипации энергии газа при коллапсе, и крутой градиент металличности из-за более эффективного звездообразования в самых внутренних частях галактики. А потом, позже, на протяжении многих миллиардов лет на эту компактную «затравку» должны были падать в большом количестве спутники; из-за большого орбитального момента их звезды должны были перемешиваться на периферии галактики, и там градиент металличности должен был пропадать, а во внутренней области — сохраняться. В результате этого, второго этапа эволюции и получались современные эллиптические галактики.

Интересно, что примерно в то же самое время аргументы в пользу такого сценария пришли с другой стороны — из наблюдений далеких эллиптических галактик на красных смещениях 1.5–2. Накопились данные с Хаббловского космического телескопа по изображениям далеких гигантских эллиптических галактик со звездной массой больше ста миллиардов солнечных масс, и оказалось, что тогда, 9–10 млрд лет назад, гигантские эллиптические галактики имели размер в 5–7 раз меньше, чем эллиптические галактики с такой же массой имеют в наши дни ([7], например). Стали искать механизм динамической эволюции, который позволил бы сильно увеличить размер («раздуть» галактику), не сильно изменяя ее массу. Большой мерджинг не подходил: при большом мерджинге размер увеличивается пропорционально массе. Если взять на $z = 2$ галактику массой 200 млрд солнечных масс и большим мерджингом увеличить ее в пять

раз, то получится масса триллион солнечных масс! Таких огромных эллиптических галактик рядом с нами в большом количестве нет. И в результате исследователи пришли к «двухфазному» сценарию [8]: сначала в быстром слиянии газовых сгустков (что эквивалентно сценарию монолитного коллапса по Ларсону) бурно рождаются звезды, потом звездообразование останавливается зажегшимся в центре галактики квазаром, и впоследствии на компактную, пассивно эволюционирующую затравку падают карликовые галактики без газа, которые наращивают ее радиус до современных размеров. Сейчас этот двухфазный сценарий является общепринятым; на рис. 4 я привожу картинку из галереи NASA, предназначенную для широкой публики. То есть этот сценарий формирования и эволюции эллиптических галактик стал каноническим.

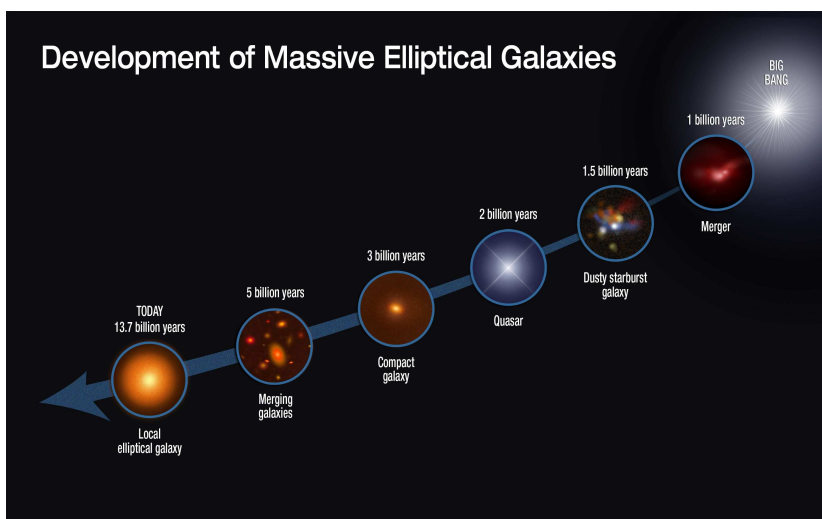


Рис. 4. Современный сценарий эволюции эллиптических галактик — NASA Legacy gallery

Библиографические ссылки

1. *Hubble E. P.* Extragalactic nebulae. // *Astrophys. J.* — 1926. — Vol. 64.
2. *Hubble E. P.* Realm of the Nebulae. — 1936.
3. *Kormendy J., Kennicutt R. C., Jr.* Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2004. — Vol. 42. — P. 603–683. [astro-ph/0407343](#).
4. *Freeman K. C.* On the Disks of Spiral and S0 Galaxies // *Astrophys. J.* — 1970. — Vol. 160. — P. 811.
5. *Kobayashi C.* GRAPE-SPH chemodynamical simulation of elliptical galaxies - I. Evolution of metallicity gradients // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2004. — Vol. 347. — P. 740–758. [astro-ph/0310160](#).
6. *Baes M., Sil'chenko O. K., Moiseev A. V., Manakova E. A.* Metallicity and age gradients in round elliptical galaxies // *Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 467. — P. 991–1001. [astro-ph/0702605](#).
7. *Trujillo I., Feulner G., Goranova Y. et al.* Extremely compact massive galaxies at $z \sim 1.4$ // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2006. — Vol. 373. — P. L36–L40. [astro-ph/0608657](#).
8. *Huang S., Ho L. C., Peng C. Y. et al.* Fossil Evidence for the Two-phase Formation of Elliptical Galaxies // *Astrophys. J. Lett.* — 2013. — Vol. 768. — P. L28. [1304.2299](#).